

文章编号: 1000-6893(2007)02-0419-06

先进复合材料格栅结构(AGS)应用与研究进展

杜善义, 章继峰, 张博明

(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

Overview of Application and Research on Advanced Composite Grid Structures

DU Shan-yi, ZHANG Ji-feng, ZHANG Bo-ming

(Center for Composites and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘 要: 具有空间点阵的先进复合材料格栅结构(AGS)是一种新型高效的结构形式,在航空、航天结构中具有良好的应用前景。介绍了 AGS 优良的各项性能以及在美国、俄罗斯等国航空、航天工程中的应用现状,着重描述了混合工艺法、模具膨胀工艺和拉挤-互锁格栅结构几种现行工艺方法,并对当前国内外针对格栅结构的力学性能和结构健康监测的研究进行了概述。最后提出了 AGS 进一步研究的工作展望。

关键词: 复合材料; 格栅结构; 力学性能; 健康监测

中图分类号: V258; TB332 文献标识码: A

Abstract: Advanced composite grid structure (AGS) is one of the most efficient lattice structures with many potential advantages, which own good application foreground in aeronautical and space engineering. First, the overview of the excellent performance and applications to AGS in USA and Russian are presented. Then, the discussion focuses on three kinds of manufacture toolings: hybrid tooling, expansion block tooling and interlocked grid structures. Researches on mechanical properties, design and structural health monitoring are summarized. Finally, the present research state is generalized and the trends in future are described.

Key words: composites; grid structure; mechanical property; health monitoring

格栅增强结构的概念是 20 世纪 70 年代由美国麦道公司首先提出^[1],其基本构想是:整个结构由加强肋与蒙皮组成,加强肋呈正多边形网格分布,结构表现各向异性。这种结构形式刚刚出现,就以较高的可设计性、优良的潜在性能而广受关注。首先,格栅结构在几何形式上具有较好的拓扑优化性,对于相同重量的结构,AGS 的截面惯性矩大,抗弯、抗屈曲性能良好,其加强肋具有较高的法向高度,相比整体化技术的另一变形体——纵横加筋结构,能获取更高的结构效率。其次,格栅结构还是一个开放式结构,与合金蜂窝夹心结构相比,克服了夹心结构在生产过程中由于水分浸入夹心层而影响结构的抗腐蚀性能的缺陷;此外,与传统的结构形式相比(如壳体结构、桁架蒙皮结构),格栅结构的加强肋是相对独立的,在冲击荷载作用下,若一根受损,裂纹不易传播,整体性能好。格栅结构概念提出之后就在惠灵顿轰炸机的机身、太阳神和 Delt 运载火箭的整流罩上首先运用,并取得成功。

结构对各个方向的强度与刚度要求不是等同的,在某个方向结构要承受荷载的大部,这就要求根据受力情况的不同来安排增强相的取向,从而实现减重、承载的高效结合,这一点对航空、航天结构尤为重要。20 世纪 90 年代,Stanford 大学提出了以纤维增强复合材料(CFRP)为加强肋的格栅结构(AGS)^[2]。复合材料的格栅结构表现出更多优越性能:与铝合金格栅结构相比,提高了结构的比强度与比模量,增强了结构的抗腐蚀能力,有利于自动化生产从而降低成本,最为突出的是增加了结构设计、制造的灵活性。此外还克服了多项其他类型复合材料结构无法跨越的缺陷,例如,层合结构的层间分层和开裂;编织复合材料结构由于其纤维的弯曲引起结构性能的退化等。研究表明 AGS 由于其自身的结构特征获得相比其他形式其强度和刚度增强 30% 以上。

一般情况下,复合材料格栅结构相比其他的传统的复合材料结构,如实体结构和夹心结构,具有如下优点:

(1) 单向复合材料加筋格栅与层合结构相比没有材料匹配问题,不会出现分层现象,具有较强的抗冲击、抗疲劳能力和较高的损伤容限。

(2) 具有结构形式的各项异性格栅结构与材料力学性能各项异性的复合材料协同工作,能更好满足结构各方向强度与刚度的不等同要求,提高结构效率,满足航天器结构的轻质化要求。

(3) 作为一个开放的复合材料结构形式,一方面格栅结构避免了夹心结构由于水分的浸入而引起的结构腐蚀,另一方面开放的结构形式还为结构的局部健康与损伤监测以及修复带来了方便。

1 AGS 国内外应用现状

AGS 的早期研究主要是前苏联和美国,直接服务于军事与航天。原苏联中央研究院 (CRISMB) 在 1981 年就启动了类似的点阵 (lattice) 结构研究,1988 年研制了运载火箭的点阵级间结构,成功试飞并经改进服役至今,1999 年制造了点阵结构的飞船附件适配器,由于其特殊军事用途,相关文献直到近年来才开始发表。1986 年 CRISMB 还成功研制了商用机的点阵机身舱段。美国空军实验室 1997 年在国家导弹防御系统试验项目 (BMDO CEP) 支持下,设计、制造了以 CFRP 为加强肋的 AGS 整流罩 (图 1 所示),整流罩重仅 37 kg,同类型铝合金防护罩重 97 kg,运用纤维缠绕技术实现了整个生产过程的自动化,同比生产工艺时间缩短 88%,比同类型蜂窝夹层结构相比制造复合材料整流罩减轻 40%,成本降低 20%^[3]。以此为基础,美国空军实验室与波音公司合作研制了直径 1.55 m、长 4.45 m 复合材料 AGS 整流罩,解决了更大型的 OSP 运载飞行器遇到的有效载荷安装空间不足的问题。Orbital Science 公司为美国空军提供集成的 OSP 运载飞行器并执行将系列军用小卫星送入轨道的任务,2000 年成功试飞并一次完成 11 个小卫星入轨的任务。在航空飞行器中,F-117 的采用先进复合材料格栅进气口,空客 A310 采用复合材料格栅安定翼。

先进复合材料格栅结构突出的综合性能优势受到了空间飞行器结构研制部门的极大重视,NASA Langley 中心研究人员把先进格栅增强结构技术列入未来航天结构技术发展的六大方向之一的低成本结构技术之内;美国空间实验室把 AGS 技术列为迎接未来空间系统技术挑战的四大结构技术之一,并且指出了这项技术未来在航天器燃料储箱、机身等大型复杂部件上应用的广阔前景^[4]。俄罗斯 CRISMB 提出 AGS 将应用于的对象

包括级间段 (图 2 所示)、内压力容器、有效载荷适配器、运载飞船整流罩、飞机中机身舱段、翼盒、直升机垂尾梁、空间望远镜镜身以及建筑结构等。

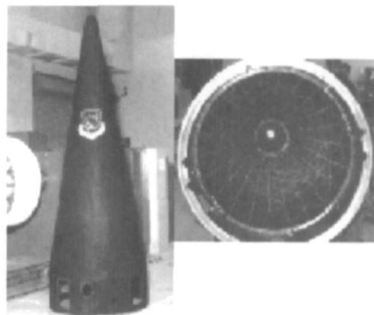


图 1 美国空军 BMDO 系统的格栅导弹整流罩

Fig 1 AFRL's AGS fairing for BMDO combined experiments program (CEP)

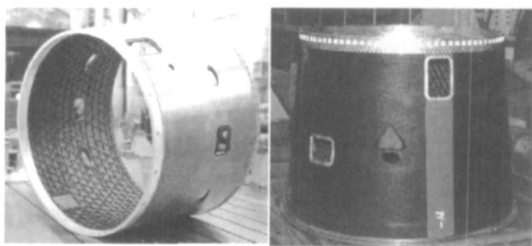


图 2 俄罗斯 CRISMB 公司研制的格栅级间段

Fig 2 Russian CRISMB's advanced composite interstage structures

AGS 的国内研究起步相对较晚,但也初具成果。航天部一院 14 所、703 所、大连理工大学合作成功研制了碳纤维等网格增强格栅结构。在国家自然科学基金的支持下,清华大学和哈尔滨工业大学对 AGS 的力学性能、设计制造以及综合性能评价等进行了初步研究。但复合材料格栅结构的力学性能复杂,有效性能和可靠性均有待研究,以致至今未在型号上应用。

2 AGS 制造技术

先进复合材料格栅结构在制作过程中首先要克服两个困难: 格栅的加筋肋是相互交叉的,交叉处会引起纤维堆积和堆积处纤维的弯曲,弯曲的纤维降低的结构力学性能,造成强度和刚度的薄弱处,在受压载荷作用下尤为明显; 为提高结构的抗弯和抗屈曲性能,要尽可能提高加筋肋法方向上的高度以获取更高的截面惯性矩。最早的 AGS 制造工艺是由菲利普实验室提出的,采用一个硅胶橡皮垫裹在一个金属的圆柱轴上,预浸纤维缠绕在硅胶橡皮垫的外表面,根据需要格栅

可以缠绕成三角形、四边形等多种形式。硅胶是一种热膨胀系数较大的材料, 缠绕之后的格栅结构在热固化时, 硅胶橡皮垫受热膨胀产生径向挤压, 挤压使“鼓囊”处纤维与树脂重新分配以至均匀。这种工艺模具形式单调, 仅限于圆柱型结构; 此外还有热膨胀不易控制与不易实现生产自动化等缺点。美国的空军实验室针对板壳结构的特征, 提出了具有代表性的混合工艺法和模具膨胀工艺^[5], 克服了以上工艺的不足, 使 AGS 得到工程上的成功应用。随后 Colwell 等人针对平板格栅结构特点提出了“铆钉增强格栅工艺”(Pin Enhanced Geometry) 和“套管增强格栅工艺”(Tooling Reinforced Interlaced Grid)^[6], 前者是应用一定量的铆钉分开加筋肋交叉处的纤维, 从而减少纤维的堆积以提高格栅的强度和刚度; 后者应用复合材料套管横向铺设, 纵向采用纤维捆绑来构造复合材料格栅结构, 复合材料横向套管起到模具和结构的双重作用。斯坦福大学的 Tsai^[7] 等人综合考虑结构成本和力学性能提出了拉挤-互锁的格栅工艺(Interlocked Composite Grids), 这种工艺方法使平板型格栅结构制作成本大为降低, 在 GLAST 太空望远镜的描述仪上首次应用取得成功^[8]。

2 1 混合工艺法

先进复合材料格栅结构的混合工艺法是由美国空军实验室的科研人员提出的。首先根据结构的形状功能要求建造特定的底模(阴模), 并在底模槽内预填塞硅胶膨胀垫, 格栅结构在经缠绕或铺层等成型工装后进行固化, 借助固化热, 预填充在槽内的硅胶膨胀垫受热膨胀, 从侧向挤压预固化的格栅增强肋, 通过控制固化热并对底模和膨胀垫进行合理设计, 有效解决加强肋在生产过程中交叉处的“鼓囊”与出法向肋条不能过高等问题。混合工艺法还具有生产可自动化、加强筋形状可控制等优点, 其工装示意如图 3。其模具由两个部分组成: 基底模具与膨胀模具。基底模具由热稳定性材料构成, 热膨胀系数小, 其表面根据 AGS 结构形状要求开槽; 膨胀模具是采用热膨胀系数较大的材料构成的垫状物, 如硅胶材料橡皮垫, 膨胀模具预置在基底模具的开槽内, 浸润纤维铺设或缠绕之后, 借助热固化的升温, 膨胀模具受热膨胀以从侧向挤压格栅肋。为达到工艺要求, 其选材必须具有较高的热膨胀率。图 4 为混合工艺法生产的复合材料格栅结构。

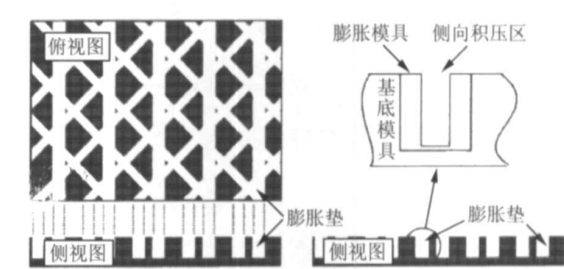


图 3 混合工艺法工装示意图
Fig 3 Schematic of hybrid tooling

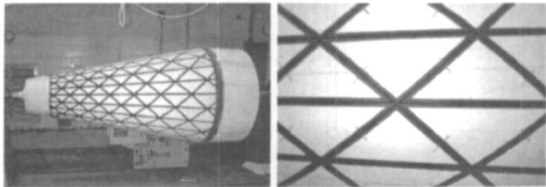


图 4 混合工艺法制作的复合材料格栅结构
Fig 4 Example of hybrid tooling: AGS and mould

2 2 模具膨胀工艺

混合工艺法虽然解决了 AGS 结构制造工程中的很多问题, 但其对模具尤其是基底模具的要求很高, 且用料浪费, 例如, 一种 AGS 结构形式就需要一套特定的模具配套, 且很难做到膨胀模具与基底模具槽精确的吻合。此外由于膨胀模具的热膨胀系数有限, 生产出的 AGS 加强筋宽度受限, 膨胀模具工艺较好地解决了以上问题。模具膨胀工艺由一个基板 and 多个形状各异的膨胀模具组成。膨胀模具由螺钉固定在基板上(可拆卸), 因此可依据格栅结构具体功能形状要求, 组装成多种几何形式各异的格栅结构。热固化时膨胀模具受热膨胀, 从两侧挤压纤维加强筋, 控制 AGS 的固化成型, 如图 5 所示。由于膨胀模具比混合工艺法中的膨胀垫更大, 膨胀侧向挤压力更强, 可生产出法方向更高的格栅肋, 因此模具膨胀工艺较好地克服了混合工艺法的不足, 更具有工程实际应用价值, 但也带来了一些新的技术难题, 如膨胀模具与基板的连接方式必须改进, 其一方面要限制膨胀模具在基板上的滑动, 另一方面又不能桎梏模具的膨胀率, 固定螺钉(Bolt) 要限制模具块(Block) 与基底模具(Base Tooling) 的相对运动, 还要给予模具块足够的膨胀自由度。此外, 针对曲面壳体结构, 膨胀模具的制作和安装也有一定的困难。图 6 为模具膨胀工艺生产的平板型格栅结构。

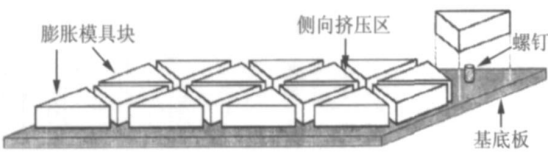


图 5 模具膨胀工艺法工装示意图

Fig 5 Schematic of expansion block tooling

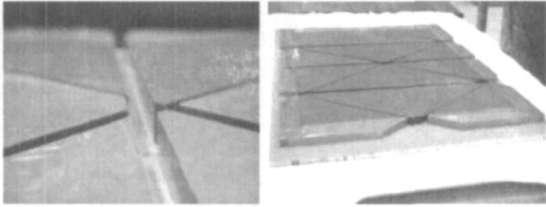


图 6 模具膨胀工艺制作的复合材料格栅结构

Fig 6 Example of hybrid tooling: AGS and mould

2 3 拉挤-互锁复合材料格栅结构

拉挤-互锁复合材料格栅结构首先利用拉挤成型工艺制造加强肋, 并对拉挤成型的肋进行开槽, 开槽后的肋经互锁组合成格栅结构, 如图 3 所示。其优点是工艺简单、成本低廉和适合规模化生产; 缺点是开槽连接处比较薄弱, 限制了在需要高性能结构上的应用。这种格栅结构的不足之处是: 抗剪性能差, 格栅肋的开槽处出现结构强度和刚度的薄弱区。针对以上缺陷, 研究人员提出了格栅体填充法、斜向支撑以及“T”型增强等方法。目前出现了一种新的增强工艺方法, 就是在开槽交接处粘结一个加强筋帽(rib-cap), 为该处的荷载传递提供了新的路径, 从而减少开槽处刚度和强度的损失(如图 7 所示)。在这种工艺方法中, 首先应用拉挤法做成具有单向性能的加强肋与加强筋帽, 对加强肋进行开槽(开槽为半个高度), 通过加强筋之间的相互咬合形成具有整体性能的格栅结构。然后将加强帽粘结在加强肋的开口面上, 上下互咬, 加强筋、加强筋帽相互粘结在一起形成一个具有整体性能的格栅结构。拉挤工

艺是一种制造具有定常截面面积连续性复合材料构件的有效方法。具有可靠性高、造价低廉、快速成型、完全自动化铺设等优点。对于中等截面尺寸结构, 成型速度每分钟达到 1 m, 纤维率高于 70%, 其刚度和强度是传统复合材料层合板、编织板的 3~ 4 倍, 其相对造价与手工铺砌、机械铺砌、纤维缠绕都要低, 使得拉挤-互锁格栅结构在综合性能/成本比上优势显著。

3 其他研究

3 1 力学性能与优化设计

作为一种新型的结构形式, AGS 的力学性能以及结构的损伤与失效模式等都是在工程应用中必须研究的课题。Steven^[9]等人在 Midlin 板假设和 Euler 梁假设条件下, 应用 Smear 法将加强肋等效成梁单元叠加到层板蒙皮中(如图 8)研究了格栅结构的本构关系模型。随后, Eyassu^[10]等人在 Steven 的基础上对 Smear 法进行了改进, 用来研究格栅结构的屈曲性能, 并通过一个三维模型验证了格栅结构屈曲载荷与蒙皮/格栅肋相对高度之间的演变关系, 从而给出了结构抗屈曲设计准则。Samuel Kidane 等人^[11]针对格栅筒壳结构, 发展了等效刚度模型, 并应用能量法实现了拉伸刚度、弯曲刚度的耦合(式(1)所示)。考虑格栅结构损伤与破坏机理, P. E. John Higgins 等人^[12]针对格栅型整流罩结构加强肋与蒙皮交接处的破坏特征, 给出了格栅肋-蒙皮的破坏准则, 通过实验进行了验证, 并直接用于指导了 Minotaur 火箭整流罩的设计。国内大连理工大学陈浩然等人研究了格栅结构的损伤机理并应用遗传算法实现了格栅结构的优化设计^[13, 14]; 哈尔滨工业大学复合材料研究所在对格栅结构工艺研究的基础上, 针对改进的拉挤-互锁格栅结构应用有限元模型研究了拉挤-互锁格栅结构的开槽以及加强帽对结构的影响, 并给出拉挤-互锁格栅结构的初步设计准则^[15]

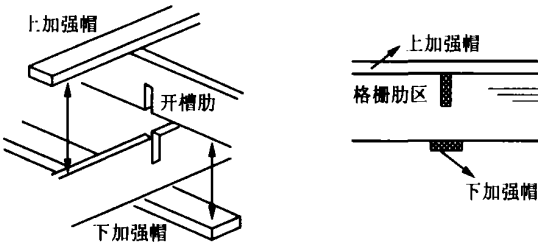


图 7 拉挤-互锁格栅结构

$$\left. \begin{aligned} N &= A\varepsilon + B\kappa \\ M &= B\varepsilon + D\kappa \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:

$$A = A_{\text{skin}} + A_{\text{grid}}$$

$$B = B_{\text{skin}} + B_{\text{grid}}$$

$$D = D_{\text{skin}} + D_{\text{grid}}$$

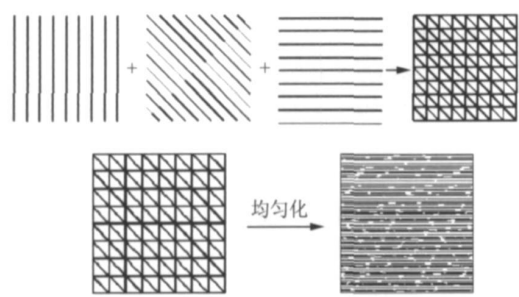


图 8 AGS 等效刚度模型示意图

Fig 8 Schematic of equivalent model of AGS

3 2 结构的损伤识别与载荷识别

先进复合材料格栅结构 AGS 在航空、航天结构具有良好的应用前景。航空、航天飞行器具有高可靠性要求, 其结构的可靠性和对其健康监测都是工程和科研人员必须考虑的内容。日本东京大学的 N. Takeda 等人^[16]率先针对飞机方向舵格栅结构进行了健康监测的研究, 他们首先提出了针对周期性格栅结构的布拉格光栅埋入和布置方法(如图 9), 并建立了一个分布式光纤传感网络对 AGS 进行了监测, 并实现了实验的验证。随后 N. Takeda 和他的合作者^[17]应用 FBG 传感网络研究了 AGS 在低速冲击下损伤缺陷的监测和定位, 将实验的结果和几个性能预报模型进行了比较, 实现了基于 FBG 传感网络的 AGS 损伤监测与定位的集成化。

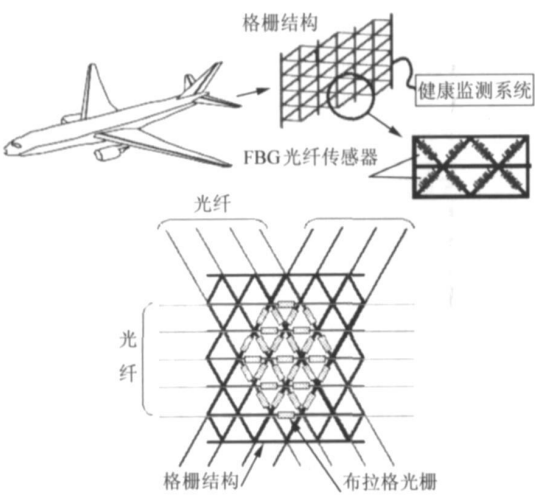


图 9 基于 FBG 的格栅结构健康监测系统与布置工装

Fig 9 SHM and layout of FGB sensors on AGS

美国提出未来的大型空天飞行器结构要在现有技术的基础上实现成本降低 90%, 地面准备周期由数月缩短为数天, 并要求对其安全性进行实时监测, 对结构健康监测技术提出了更高的要求。

斯坦福大学 Chang 等人基于此点提出了载荷识别和损伤识别的一体化的健康监测构想, 利用智能化传感网络对结构响应进行监测, 并对结构的载荷环境和损伤同时进行识别, 使结构的损伤监测具有针对性以提高损伤监测的效率, 达到缩短工期和降低成本的要求。Chang 和 Tracy 等人先后针对简支梁和复合材料层合板实现了冲击作用下载荷的识别(包括载荷位置和时程)^[18,19]。新加坡国立大学的 W. B. Ma 等人^[20]应用一个实验的格林函数实现了层合板载荷分布的重构。在国内哈尔滨工业大学复合材料研究所基于 ARX 模型和前向波动模型研究了 AGS 在冲击下载荷位置和时程的重构。

4 结束语与展望

先进复合材料格栅结构(AGS)是一种具有多种各项优良性能和发展潜力的新型复合材料结构形式。在航空、航天工程中具有良好应用前景, 极有可能是未来蜂窝夹芯结构的替代品。有关 AGS 结构的研究, 以美、俄等国为代表, 投入了一定的人力和财力, 在 AGS 的优化设计、制造工艺以及结构健康监测等方面取得了一定的研究成果, 国内也开始了相关研究。作为一种新型的结构形式, 笔者认为还有如下几个方面需要进一步研究:

(1) 制造工艺 以混合工艺法、模具膨胀工艺和拉挤互锁格栅为代表的工艺方法都取得较大成功和应用, 未来的研究工作应该着重于工艺的可靠性、可重复性以及低成本的要求, 努力发展大型复杂格栅结构的集成化成型工艺方法。

(2) 结构的力学性能 作为一种新型的结构形式, 其结构的力学性能还有待进一步研究, 尤其格栅-单面蒙皮结构为不对称形式, 结构分析时要考虑到拉-弯耦合效应, 结构的一次成型时还有残余应力问题都值得研究, 此外尤其是损伤模型和破坏机理还有待进一步研究, 并能将结构的健康监测和损伤机理进行一体化研究。

(3) 应用范围 AGS 已经在航天整流罩和航空飞行器上取得应用, 进一步应用研究还有待加强, 寻求飞行器典型构件的可行替代以及在其他工程领域, 如土木、汽车工程中的应用。

(4) 周期各向异性结构体的动力学特征 AGS 是一个典型的周期性各向异性结构体, 它的动力学特征以及健康监测中应力波在结构中的传播都值得进一步研究。

参考文献

- [1] Huybrechts S, Meink T E. Advanced grid stiffened structures for the next generation of launch vehicles [C]// 1997 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Kahala: IEEE, 1997: 263-269.
- [2] Chen H J. Analysis and optimum design of composite grid structures [D]. Stanford, CA: Stanford University, 1995.
- [3] Peter M W, Jeff M G, Steven M H, et al. Advanced grid stiffened composite payload shroud for the OSP launch vehicle [C]// 2000 IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2000.
- [4] Ahmed K N, Samuel L, Donald B, et al. Structural technology for future aerospace system [J]. Computers and Structures, 2000, 74(5): 507-519.
- [5] Steven M H, Troy E M, Peter M W, et al. Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures [J]. Composites: Part A, 2002, 33(2): 155-161.
- [6] Colwell T B. The Manufacturing and Application of Composite Grid Structures [D]. Stanford, CA: Stanford University, 1996.
- [7] Han D Y, Tsai S W. Interlocked composite grids design and manufacturing [J]. Journal of Composite Materials, 2003, 37(4): 287-316.
- [8] Hicks M T. Design of carbon fiber composite grid structure for the GLAST space using a novel manufacturing technique [D]. Stanford, CA: Stanford University, 2001.
- [9] Huybrechts S. Analysis and behavior of grid structures [D]. Stanford, CA: Stanford University, 1995.
- [10] Wodesenbet E, Kidane S, Pang S S. Optimization for buckling loads of grid stiffened composite panels [J]. Composite Structures, 2003, 60(2): 159-169.
- [11] Samuel K, Li G Q, Jack H, et al. Buckling load analysis of grid stiffened composite cylinders [J]. Composites: Part B, 2003, 34(1): 1-9.
- [12] Higgins J, Wegner P, Sanford G, et al. Design and testing of the Minotaur advanced grid-stiffened fairing [J]. Composite Structures, 2004, 66(4): 339-349.
- [13] 白瑞祥, 王蔓, 陈浩然, 等. 含损伤复合材料 AGS 板的屈曲特征 [J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 136-141.
- Bai R X, Wang M, Chen H R. Buckling behavior of composite AGS with delamination [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2005, 22(4): 136-141. (in Chinese)
- [14] 张志峰, 陈浩然, 李暄, 等. 先进复合材料格栅圆柱壳优化设计的混合遗传算法 [J]. 复合材料学报, 2005, 22(2): 166-177.
- Zhang Z F, Chen H R, Li X, et al. Hybrid genetic algorithm for optimum design of advanced grid composite circular cylinders [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2005, 22(2): 166-177. (in Chinese)
- [15] Zhang J F, Zhang B M, Du S Y. Design and manufacture of improved interlocked composite grid structures [C]// CCC2005. Lyon, France: [s. n.], 2005: 693-701.
- [16] Takeya H, Ozaki T, Takeda N. Structural health monitoring of advanced grid structure using multi-point FBG sensors [C]// Smart Structures and Materials 2005. Proc of SPIE: Vol. 5762. 2005: 204-211.
- [17] Amano M, Takahashi I, Okabe Y, et al. Identification of damage location in advanced grid structures using fiber bragg grating sensor [C]// Smart Structures and Materials 2005. Proc of SPIE: Vol. 5765, 2005: 644-655.
- [18] Choi K Y. An impact load identification method using distributed sensor measurement [D]. Stanford, CA: Stanford University, 1994.
- [19] Tracy M J. Identifying impacts in composite plates with piezoelectric sensors [D]. Stanford, CA: Stanford University, 1996.

作者简介:



杜善义(1938-) 男, 中国工程院院士、教授、博士生导师。主要研究方向: 复合材料与结构及其评价、固体力学、航天器结构。现任国际复合材料委员会执委, 中国复合材料学会副理事长。国际杂志《Journal of Composite Materials》, 《Composites Science and Technology》, 《Acta Mechanica Sinica》, 《Acta Mechanica Solida Sinica》《International Journal of Computational Methods》编委。

E-mail: sydu@hit.edu.cn



章继峰(1976-) 男, 在读博士研究生。主要研究方向: 先进复合材料结构与复合材料结构的健康监测。

E-mail: jfzhang@hit.edu.cn



张博明(1966-) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 智能材料与结构、复合材料制造工艺的信息化与低成本技术。

E-mail: zbm@hit.edu.cn

(责任编辑: 蔡斐)